

# 基于 Stateflow 的自动飞行模式转换逻辑研究

周超\* 邵慧 刘文渊 岳峰

(上海飞机设计研究院,上海 201210)

## 摘要:

现代民用飞机的自动飞行模式有很多种,且各模式间相互关联和影响,容易造成模式转换的混乱。为解决模式转换的混乱问题,对自动飞行模式转换逻辑进行了研究,分别梳理了飞行指引、自动驾驶仪以及横向和纵向模式转换关系。利用 Stateflow 搭建了自动飞行各功能的模式转换模型,同时利用 Matlab 的 GUI 搭建仿真的飞行控制板和自动飞行模式显示界面,模拟仿真飞机的自动飞行模式转换功能。最后通过预期的模式转换矩阵的方式验证平台中模式转换的正确性。

关键词: 模式转换;飞行控制板;Stateflow;飞行指引;模式转换矩阵

中图分类号: V249.1

文献标识码: A

OSID:



## 0 引言

现代民用飞机中自动飞行系统是非常重要的系统,其在飞机的起飞、爬升、巡航、进近和着陆阶段中都起到关键作用。其既可以给飞行员提供指引又可以自动驾驶飞机,减轻飞行员负担。飞行员可通过旋钮或其他控制器使飞机自动改变航向或俯仰角,还可以自动保持飞机进行定高飞行<sup>[1-2]</sup>。

民用飞机的自动飞行模式有几十种,在不同的飞行阶段,需要切换使用不同的工作模式。有的模式之间是互相关联和影响的,容易造成混淆、不兼容性问题。因此对自动飞行模式转换逻辑进行研究很有必要。

## 1 自动飞行功能及模式转换介绍

自动飞行功能一般包括飞行导引、飞行指引、自动驾驶仪、自动配平和偏航阻尼等功能<sup>[3]</sup>。其中,飞行导引主要是利用飞机的各个传感器输出的高度、速度、航向等参数以及飞行员预选或飞管输出的高度、速度、航向等目标值,计算飞行导引指令,并发送给飞行指引或自动驾驶仪。飞行指引则是用于在

主飞行显示器(PFD)或平显(HUD)上显示计算的导引指令,以指导飞行员跟踪飞行。自动驾驶仪则接受来自飞行导引的指令,驱动俯仰、滚转和方向舵伺服,控制飞机的姿态,以跟踪飞行员预选或飞行管理提供的目标值。

飞行导引主要是由模式转换逻辑运算和控制律计算两部分组成。其中,模式转换逻辑运算是综合考虑当前飞机状态以及飞行机组的操作,判断出飞机的横向或纵向模式、自动驾驶仪是否接通和飞行指引是否接通等。同时主飞行显示器(PFD)的飞行模式通告(FMA)区域显示自动飞行模式,指示飞行员当前所处的模式。由于自动飞行的模式众多,各模式间的转换关系错综复杂,为避免出现模式混乱、重复迭代等现象,有必要对自动飞行的各个模式进行梳理,并利用仿真工具搭建仿真平台软件,模拟仿真各个模式之间转换过程,验证模式之间转换关系的正确性<sup>[4-5]</sup>。

## 2 自动飞行模式转换逻辑研究<sup>[6-7]</sup>

### 2.1 飞行指引接通断开逻辑

现代民用飞机基本都配备两套飞行指引,其控

\* 通信作者. E-mail: 1181862039@qq.com

引用格式: 周超,邵慧,刘文渊,岳峰. 基于 Stateflow 的自动飞行模式转换逻辑研究[J]. 民用飞机设计与研究,2019(4):86-91. ZHOU C, SHAO H, LIU W Y, YUE F. Mode transition logic of automatic flight control system based on stateflow[J]. Civil Aircraft Design and Research,2019(4):86-91(in Chinese).

制开关位于飞行控制板两侧,分别靠近主驾驶和副驾驶位置。飞行员可通过按压相应侧的 FD 按钮,激活本侧的飞行指引。飞行指引激活后,会在 PFD 上显示洋红色的“+”或倒“V”字型标识。

一般 FD 可通过如下操作接通:①按压 FD 按钮;②横向模式发生改变;③纵向模式发生改变;④激活自动驾驶仪;⑤触发速度保护;⑥触发风切变告警。

FD 断开则直接是在 FD 激活条件下再次按压 FD 按钮。一般上电后默认 FD 是断开的。

## 2.2 自动驾驶仪接通断开逻辑

自动驾驶仪状态主要分三种:接通、断开和同步。目前自动驾驶仪控制飞机主要有两种方式:第一种是飞行导引指令发送给俯仰和滚转伺服,驱动驾驶杆的运动,同时驾驶杆位移信号经过飞控计算机发送给舵面的伺服,驱动舵面的运动,从而控制飞机的姿态;第二种是飞行导引指令直接发送给飞行控制计算机,飞行控制计算机控制舵面的伺服,驱动舵面的运动。自动驾驶仪断开时,则需要人工操作驾驶杆,控制舵面运动。自动驾驶仪同步状态是用于在自动驾驶仪接通情况下,人工短暂的控制飞机,此时自动驾驶仪短暂的断开,当同步状态清除后,自动驾驶仪又自动恢复接通。

自动驾驶仪接通可通过按压 AP 按钮激活。

自动驾驶仪通过如下方式操作断开:①飞行员超控驾驶杆;②按压驾驶杆上的 AP 断开按钮;③按压 TOGA 按钮;④发生抖杆;⑤AP 接通情况下按压 AP 按钮。

自动驾驶仪进入同步状态则是在 AP 接通情况下,飞行员按压 SYNC 按钮不放,当释放 SYNC 按钮,AP 退出同步状态进入接通状态。

## 2.3 自动飞行横向模式转换逻辑

自动飞行横向模式主要有滚转保持模式 ROLL、航向选择模式 HDG、横向导航模式 LNAV、横向进近模式 APPR、起飞模式 TO 和复飞模式 GA。

### 1) 滚转保持模式 ROLL

滚转保持模式是保持飞机当前的滚转角或航向。滚转保持模式 ROLL 是横向模式的基本模式。一般,上电时横向模式默认进入滚转保持模式。

可通过如下操作进入 ROLL 模式:①飞行指引 FD 和自动驾驶 AP 都断开;②在其他模式下按压相应的按钮(如在 HDG 模式下,按压 HDG 按钮);③

更改飞行导引耦合侧。

### 2) 航向选择模式 HDG

航向选择模式是产生指令捕获预选的航向。飞行员可通过 HDG 开关选择航向选择模式,通过飞行控制板上的航向旋钮更改预选航向。

### 3) 横向导航模式 LNAV

横向导航模式是产生指令捕获和跟踪导航信息。导航源主要有 VOR、LOC 或 FMS 等。一般横向导航模式先进入预位状态,使用航向选择模式捕获导航源,当捕获到导航源,则横向导航模式激活,并按导航源提供指令跟踪导航源<sup>[8]</sup>。

### 4) 横向进近模式 APPR

横向进近模式是产生指令执行横向的捕获和跟踪。横向进近模式一般需要导航源提供导航信息。其原理和导航模式类似,先进入预位状态,当捕获到进近模式下的导航源,横向进近模式激活,按照导航源提供指令跟踪导航源进近。

### 5) 起飞复飞模式 TOGA

横向起飞复飞模式下是产生指令保持机翼水平,保持飞机当前的航向。当飞机在地面,按压 TOGA 按钮,进入起飞模式 TO。当飞机在空中,按压 TOGA 按钮,进入复飞模式 GA。且在进入起飞复飞模式时,应断开自动驾驶仪。

## 2.4 自动飞行纵向模式转换逻辑

自动飞行纵向模式主要有俯仰保持模式 PTCH、飞行高度层改变模式 FLC、垂直速度模式 VS、高度保持模式 ALT、高度选择模式 ALTS、纵向进近模式 APPR、起飞模式 TO、复飞模式 GA。

### 1) 俯仰保持模式 PTCH

俯仰保持模式 PTCH 是保持飞机的俯仰角为预选的俯仰角,可通过俯仰手轮更改俯仰基准值。俯仰保持模式 PTCH 是纵向模式的基本模式。一般,上电时默认进入 PTCH 模式。

可通过如下操作进入 PTCH 模式:①其他模式下调整俯仰手轮;②飞行指引 FD 和自动驾驶 AP 都断开;③在其他模式下按压相应的按钮(如在 FLC 模式下,按压 FLC 按钮);④更改飞行导引耦合侧。

### 2) 飞行高度层改变模式 FLC

飞行高度层改变模式是发出指令保持空速或马赫数基准或者最小的垂直速度使飞机飞向目标高度。进入 FLC 模式可以通过:①其他模式下按压

FLC 按钮;②退出速度保护模式。

### 3)垂直速度模式 VS

垂直速度模式是产生指令保持当前的预选垂直速度使飞机飞向目标高度。可通过俯仰手轮更改垂直速度基准值。进入 VS 模式可以通过:其他模式下按压 VS 按钮。

### 4)高度保持模式 ALT

高度保持模式是发出指令捕获和跟踪当前的绝对气压高度。进入 ALT 模式可以通过:①其他模式下按压 ALT 按钮;②在高度选择模式下改变预选高度。

### 5)高度选择模式 ALTS

高度选择模式是发出指令捕获和跟踪预选的相对气压高度。通常,高度选择模式 ALTS 是预位的状态,当飞机高度接近预选的相对气压高度时,ALTS 模式激活。

### 6)起飞复飞模式 TOGA

起飞和复飞模式是飞机离地时给出的导引模式,当在地面状态按压 TOGA 按钮,则进入起飞模式。当在空中状态按压 TOGA 按钮,则进入复飞模式。

## 3 基于 Stateflow 的自动飞行模式转换逻辑平台搭建

基于 Stateflow 搭建的自动飞行模式转换逻辑平台架构如图 1 所示。

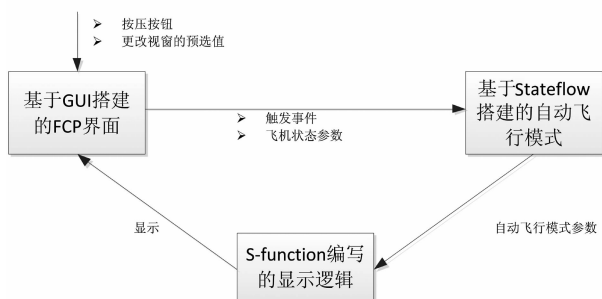


图 1 自动飞行模式转换逻辑平台搭建架构

通过 GUI 工具搭建飞行控制板 FCP 界面,当按压按钮或更改视窗上的预选值,FCP 界面将触发的事件和飞机状态参数传递给 Stateflow 中进行模式转换运算。经过模式转换运算后,输出自动飞行模式的重要参数(如横向模式、纵向模式、FD1/2 是否接通)。利用这些参数,编写 S-function 计算各个模式显示的逻辑,并传递给 FCP 界面,用于在飞行模式通告 FMA 区域显示当前的自动飞行模式,并控制各个模式反馈灯光点亮或熄灭。

利用 GUI 搭建的飞行控制板 FCP 界面如图 2 所示。

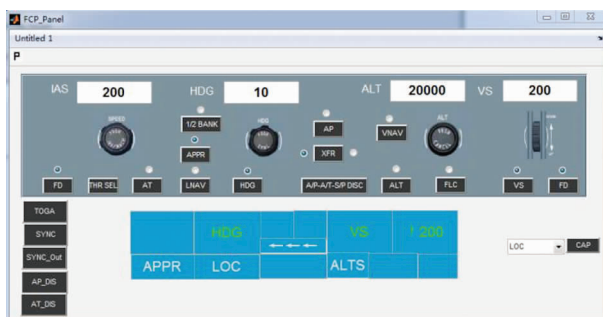


图 2 GUI 搭建的 FCP 面板

在搭建的 GUI 界面上,上半部是仿真 FCP 面板的界面,第一行是预选空速视窗、预选航向视窗、预选高度视窗和预选垂直速度视窗。下面是 FCP 面板上的各种按钮,有 FD 按钮、横向和纵向模式的按钮、AP 按钮以及切换耦合侧 XFR 按钮。在各个按钮上方安置了模式反馈灯,当该模式接通时,相应的模式反馈灯点亮。

下半部左侧是表示在驾驶杆或油门杆上的几个按钮:起飞复飞按钮、同步按钮、自动驾驶仪断开按钮,中间是用于显示自动飞行的模式通告,其中第一行是显示自动飞行激活的模式,第二行是显示自动飞行预位的模式。右侧是表示选择导航源:FMS、VOR 和 LOC。旁边添加了个捕获 CAP 按钮,用于模拟捕获导航源的场景。

基于 Stateflow 搭建自动飞行模式转换的框图,搭建的框图如图 3 所示。

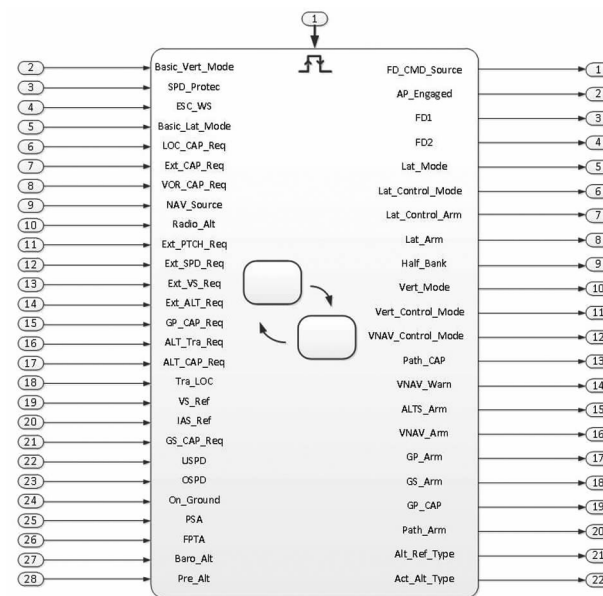


图 3 自动飞行模式转换 Stateflow 框图

在自动飞行模式转换的总体框架图中,定义了模式转换过程中所需要的输入和输出。其中,输入包含飞行员的操作事件(如飞行员按压 FD 按钮)和飞机的状态参数(如是否捕获 LOC 信号)。输出则为飞机自动飞行模式等参数。

在 Stateflow 框图内部,则是搭建了自动飞行各功能模式之间转换关系,如图 4 所示。

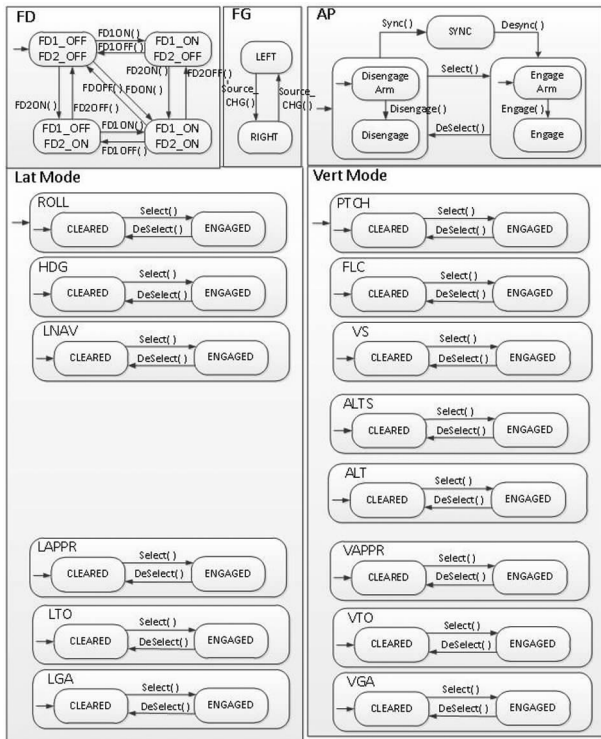


图 4 基于 Stateflow 搭建的自动飞行模式

图 4 中,主要是搭建了飞行指引 FD、自动驾驶仪 AP、飞行耦合侧 FD\_Command\_Source、横向模式 Lateral\_Modes 和纵向模式 Vertical\_Modes 转换的 Stateflow,并定义好各功能之间的执行顺序。

以横向模式 HDG 转换的 Stateflow 为例,其框图如图 5 所示。

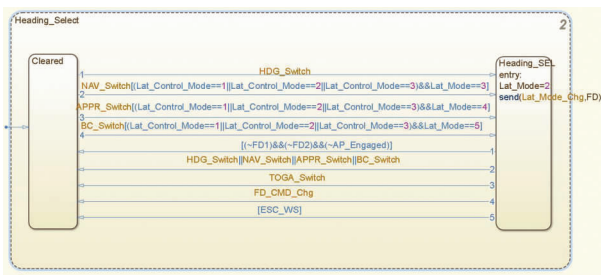


图 5 横向模式 HDG 转换 Stateflow

每个模式都有个 Cleard 状态,表示当前退出该模式。当满足进入某个模式的条件,则由该模式的 Cleard 状态进入激活状态,而原来的模式则进入 Cleard 状态。如在 HDG 模式下,发生耦合侧改变事件 FD\_CMD\_Chg 时,HDG 模式进入 Cleard 状态,当按压 HDG 按钮,则 HDG 模式进入 Engaged 状态,表示 HDG 模式激活。在上电时 Power\_up, ROLL 模式激活,其他模式都进入到默认的 Cleared 状态。

### 4 基于 Stateflow 的自动飞行模式转换逻辑平台验证

基于 Stateflow 搭建的自动飞行模式转换逻辑,可以利用模式转换矩阵对搭建的平台进行验证<sup>[9-10]</sup>。以自动飞行横向模式转换矩阵为例,如表 1 所示。表 1 中列举出在各个模式下按压不同按钮后,自动飞行模式转换预期的结果。

表 1 自动飞行横向模式转换矩阵

操作	ROLL	LNAV	HDG	APPR	TO/GA
接通 AP	模式: ROLL 模式灯: AP(1)	模式: LNAV 模式灯: LNAV(1) AP(1)	模式: HDG 模式灯: HDG(1) AP(1)	模式: APPR 模式灯: APPR(1) AP(1)	模式: TO/GA 模式灯: AP(1)
断开 AP	模式: ROLL 模式灯: AP(0)	模式: LNAV 模式灯: LNAV(1) AP(0)	模式: HDG 模式灯: HDG(1) AP(0)	模式: APPR 模式灯: APPR(1) AP(0)	模式: TO/GA 模式灯: AP(0)
断开 FD	模式: ROLL 模式灯: FD(0)	模式: ROLL 模式灯: LNAV(0) FD(0)	模式: ROLL 模式灯: HDG(0) FD(0)	模式: ROLL 模式灯: APPR(0) FD(0)	模式: ROLL 模式灯: APPR(0) FD(0)
按压 LNAV (0)	导航预位 模式: HDG 模式灯: LNAV(1) HDG(1) 导航激活 模式: LNAV 模式灯: LNAV(1) HDG(0)	导航预位 模式: HDG 模式灯: LNAV(1) HDG(1) 导航激活 模式: LNAV 模式灯: LNAV(1) HDG(0)	导航预位 模式: HDG 模式灯: LNAV(1) HDG(1) 导航激活 模式: LNAV 模式灯: LNAV(1) HDG(0)	导航预位 模式: HDG 模式灯: LNAV 模式灯: APPR(0) LNAV(1)	导航预位 模式: HDG 模式灯: LNAV(1) HDG(1) 导航激活 模式: LNAV 模式灯: LNAV(1) HDG(0)

续表 1

操作	ROLL	LNAV	HDG	APPR	TO/GA
按压 LNAV (1)		模式: ROLL 模式灯: LNAV(0)	导航预位 模式:HDC 模式灯: LNAV(0) HDC(1)		
按压 HDC (0)	模式: HDC 模式灯: HDC(1)	模式: HDC 模式灯: HDC(1) LNAV(0)		模式: HDC 模式灯: APPR(0) HDC(1)	模式: HDC 模式灯: HDC (1)
按压 HDC (1)			模式:ROLL 模式灯: HDC(0)		
按压 XFR		模式: ROLL 模式灯: LNAV(0)	模式: ROLL 模式灯: HDC(0)	模式:ROLL 模式灯: APPR(0)	
按压 APPR (0)	进近预位 模式: HDC 模式灯: APPR(1) HDC(1) 进近激活 模式: APPR 模式灯: APPR(1) HDC(0)	模式: APPR 模式灯: APPR(1) LNAV(0)	进近预位 模式:HDC 模式灯: APPR(1) HDC(1) 进近激活 模式:APPR 模式灯: APPR(1) HDC(0)	进近预位 模式: HDC 模式灯: APPR(1) HDC(1) 进近激活 模式:APPR 模式灯: APPR(1) HDC(0)	
按压 APPR (1)			进近预位 模式: HDC 模式灯: APPR(0) HDC(1)	模式: ROLL 模式灯: APPR(0)	
按压 TOGA (地面)	模式: TO 模式灯: LNAV(0)	模式: TO 模式灯: LNAV(0)	模式: TO 模式灯: HDC(0)	模式: TO 模式灯: APPR(0)	模式: TO
按压 TOGA (空中)	模式: GA 模式灯: LNAV(0)	模式: GA 模式灯: LNAV(0)	模式: GA 模式灯: HDC(0)	模式: GA 模式灯: APPR(0)	模式: GA

表 1 横向列举出各个模式在各种事件下的变化情况以及 FCP 上按钮的模式反馈灯点亮熄灭情况,其中(0)表示该按钮的模式反馈灯熄灭,(1)表示该

按钮的模式反馈灯点亮。如:当在横向导航模式 LNAV 下,在 APPR 按钮的模式反馈灯熄灭情况下按压 APPR 按钮 APPR(0),系统会先进入进近预位状态,此时的横向模式为 HDG,APPR 和 HDG 按钮的模式反馈灯都是点亮的。当进近模式激活时,此时横向模式为 APPR,APPR 按钮的模式反馈灯仍点亮,HDC 按钮的模式反馈灯熄灭。

通过在搭建的平台上按压不同按钮,观察模式反馈灯点亮与否及 FMA 区域显示的模式,验证了基于 Stateflow 搭建的自动飞行模式转换与模式转换矩阵中的预期结果为一致。

### 5 结论

1)为解决自动飞行模式繁杂,容易造成模式转换混乱的问题,对民用飞机常用的自动飞行模式进行了研究。梳理了各模式之间转换的逻辑,包括飞行指引模式、自动驾驶仪模式、飞行耦合侧模式以及横向和纵向模式。

2)为实现自动飞行模式转换逻辑的设计,利用了仿真工具 Stateflow 搭建仿真平台,并利用 GUI 搭建了 FCP 面板和 FMA 的显示界面,仿真飞行员操作和飞机状态参数改变时模式转换的过程。

3)为验证模式转换逻辑的正确性,介绍了模式转换矩阵的应用,最后通过预期的模式转换结果,包括 FMA 区域显示的模式和 FCP 板上的模式反馈灯,验证了搭建的自动飞行模式转换平台的正确性,为民用飞机自动飞行模式转换逻辑的设计和验证提供参考和指导。

### 参考文献:

[ 1 ] 申安玉, 申学仁, 李云保. 自动飞行控制系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003: 6-7.  
 [ 2 ] 布罗克豪斯. 飞行控制[M]. 金长江, 译. 北京: 国防工业出版社, 1999: 260-261.  
 [ 3 ] 徐军, 欧阳绍修. 运输类飞机自动飞行控制系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013: 6-9.  
 [ 4 ] 杨玉蕾. 民机自动飞行系统工作模式研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012: 1-6.  
 [ 5 ] 杨玉蕾, 杨忠, 杨家成. 基于 Stateflow 的民机自动飞行工作模式切换[J]. 应用科技, 2012, 39(1): 65-69.  
 [ 6 ] 穆艳庆. A320 飞行控制逻辑研究[D]. 天津: 中国

- 民航大学, 2010: 16-42.
- [7] 高振兴, 徐彧. 民机自动飞行模式设计规范与适航性分析[J]. 西安: 航空计算技术, 2017: 80-84.
- [8] 邵慧, 岳峰, 徐宏哲. 民用飞机自动飞行系统导航模式及相关告警设计[J]. 电子技术与软件工程, 2016(4): 31-31.
- [9] RATHINA K V \*, NANDA M, JAYANTHI J. . Analyze the mode transition logic of automatic flight control system using semi-formal approach[J]. Journal of Aeronautics & Aerospace Engineering, 2016(5): 167.
- [10] NAIR A S. Logic for mode transition of autopilots in lateral direction for commercial aircrafts[J]. Bonfring In-

ternational Journal of Man Machine Interface, 2013, 3(1).

#### 作者简介

周超 男, 硕士研究生, 工程师。主要研究方向: 飞行器结构设计、自动飞行系统等。E-mail: 1181862039@qq.com

邵慧 女, 硕士研究生, 工程师。主要研究方向: 自动飞行。E-mail: shaohui@comac.cc

刘文渊 男, 硕士研究生, 工程师。主要研究方向: 自动飞行系统。E-mail: liuwenyuan@comac.cc

岳峰 男, 硕士研究生, 工程师。主要研究方向: 自动飞行系统。E-mail: yuefeng@comac.cc

## Mode transition logic of automatic flight control system based on stateflow

ZHOU Chao \* SHAO Hui LIU Wenyuan YUE Feng

(Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Shanghai 201210, China)

**Abstract:** There are many auto-flight system modes in modern civil aircraft; they are interrelation and influence among these modes; and it is easy to cause mode confusion. To resolve the problem of mode confusion, this paper focuses on investigation about mode logic of automatic flight control system and summarizes the translation relationship of flight director, auto pilot, lateral modes and vertical modes. Utilizing Stateflow, we established the model of automatic flight control system functions; the simulated flight control panel & the display interface of automatic flight mode was set up by the tool of GUI in Matlab software; and the automatic flight mode transition was simulated. Finally, the validity of the mode transition was verified by expected mode transition logic matrix.

**Keywords:** mode transition; flight control panel; stateflow; flight direct; mode transition array

\* Corresponding author. E-mail: 1181862039@qq.com